

**SEMICONDUCTOR MAGNETIC SUBSTANCE**

Patent Number: JP2001257394  
Publication date: 2001-09-21  
Inventor(s): TAMURA HIROYUKI; SHIRAISHI KENJI; TAKAYANAGI HIDEAKI  
Applicant(s): NIPPON TELEG & TELEPH CORP  
Requested Patent: ☐ JP2001257394  
Application Number: JP20000374332 20001208  
Priority Number(s):  
IPC Classification: H01L43/08; G11B5/39; H01F1/40  
EC Classification:  
Equivalents:

---

**Abstract**

---

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a semiconductor magnetic substance, having a flat-band structure by forming a quantum stream, while using semiconductor manufacturing technology and growing technology.  
SOLUTION: This magnetic substance is formed by making electrons movable between adjacent quantum dots and including the flat-band structure, in which energy diffusion of electrons hardly depends on wave number, in an electron energy band by locating the semiconductor quantum dots, with which the area of high energy potential is formed around the periphery and the electrons are contained, on grid points.

---

Data supplied from the esp@cenet database - I2

## 書誌

(19)【発行国】日本国特許庁(JP)  
(12)【公報種別】公開特許公報(A)  
(11)【公開番号】特開2001-257394(P2001-257394A)  
(43)【公開日】平成13年9月21日(2001. 9. 21)  
(54)【発明の名称】半導体磁性体  
(51)【国際特許分類第7版】

H01L 43/08  
G11B 5/39  
H01F 1/40

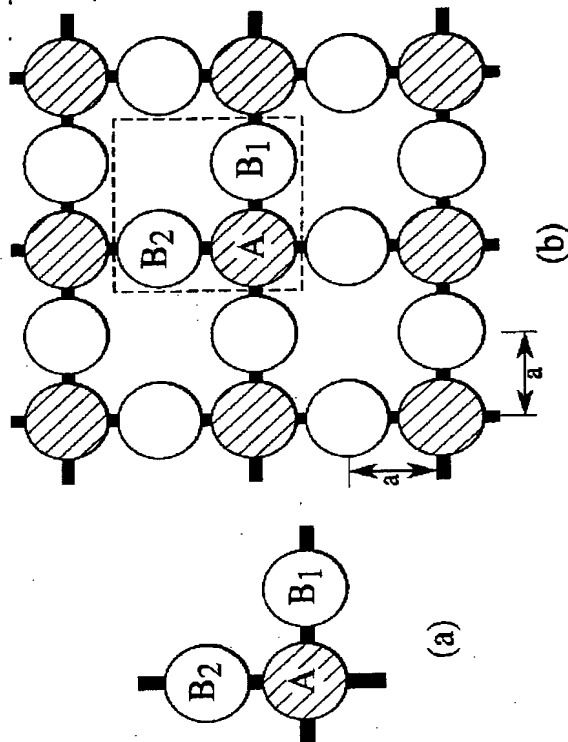
## 【FI】

H01L 43/08 S  
G11B 5/39  
H01F 1/00 A

【審査請求】有  
【請求項の数】25  
【出願形態】OL  
【全頁数】17  
(21)【出願番号】特願2000-374332(P2000-374332)  
(22)【出願日】平成12年12月8日(2000. 12. 8)  
(31)【優先権主張番号】特願平11-350297  
(32)【優先日】平成11年12月9日(1999. 12. 9)  
(33)【優先権主張国】日本(JP)  
【新規性喪失の例外の表示】特許法第30条第1項適用申請有り 2000年9月10日(社)日本物理学会発行の「日本物理学会講演概要集第55巻2号」に発表  
(71)【出願人】  
【識別番号】000004226  
【氏名又は名称】日本電信電話株式会社  
【住所又は居所】東京都千代田区大手町二丁目3番1号  
(72)【発明者】  
【氏名】田村 浩之  
【住所又は居所】東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日本電信電話株式会社内  
(72)【発明者】  
【氏名】白石 賢二  
【住所又は居所】東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日本電信電話株式会社内  
(72)【発明者】  
【氏名】高柳 英明  
【住所又は居所】東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日本電信電話株式会社内  
(74)【代理人】  
【識別番号】100083806  
【弁理士】  
【氏名又は名称】三好 秀和(外1名)

## 要約

(57)【要約】  
【課題】半導体加工技術及び成長技術を用いて量子ドット列を形成することにより、フラットバンド構造を持つ半導体磁性体を提供すること。  
【解決手段】格子点上に、周囲にエネルギーポテンシャルの高い領域が形成され電子が閉じ込められた半導体量子ドットを配置することにより、隣接した量子ドット間を電子が移動可能であり、電子のエネルギー分散が波数依存性をほとんど持たないフラットバンド構造が電子エネルギーバンドに含まれるようにすることにより磁性体が形成される。



# 請求の範囲

## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 格子点上に、周囲にエネルギーポテンシャルの高い領域が形成され電子が閉じ込められた半導体量子ドットを配置することにより、隣接した量子ドット間を電子が移動可能であり、電子のエネルギー分散が波数依存性をほとんど持たないフラットバンド構造が電子エネルギーバンドに含まれるようしたことを特徴とする半導体磁性体。

【請求項2】 前記半導体量子ドットは、直交格子の交差点にある第1の格子点上に配置された第1の量子ドットと、直交格子の交差点の中間点にある第2の格子点上に配置された第2の量子ドットと、を含むことを特徴とする請求項1記載の半導体磁性体。

【請求項3】 前記半導体量子ドットは、一つの第1の量子ドットと二つの第2の量子ドットを、一つの第2の量子ドットが第1の量子ドットの右側になり、もう一つの第2の量子ドットが第1の量子ドットの上側になるように二次元的に配置して一つの単位を形成し、該単位を複数個周期的に連らせて全体構成を形成するように配置されていることを特徴とする請求項2記載の半導体磁性体。

【請求項4】 第1の量子ドットは量子ドット間を電子が移動できる方向を4枝有し、第2の量子ドットは各々量子ドット間を電子が移動できる方向を2枝有し、前記一つの単位の第1の量子ドットの上側と右側の2枝が、前記一つの単位の一つの第2の量子ドットの左側の1枝と前記一つの単位のもう一つの第2の量子ドットの下側の1枝と結合され、前記一つの単位の第1の量子ドットの下側と左側の2枝が、左隣りの単位の第2の量子ドットの右側の1枝と下隣りの単位の第2の量子ドットの上側の1枝と結合され、前記一つの単位の一つの第2の量子ドットの右側の1枝が右隣りの単位の第1の量子ドットの左側の1枝と結合され、前記一つの単位のもう一つの第2の量子ドットの上側の1枝が上隣りの単位の第1の量子ドットの下側の1枝と結合されるように、第1、第2の量子ドットが結合されたことを特徴とする請求項3記載の半導体磁性体。

【請求項5】 前記半導体量子ドットは、第1の直線格子線上にある第1の格子点上に配置された第1の量子ドットと、第1の直線格子と直交する第2の直線格子の両端点にある第2の格子点上に配置された第2の量子ドットと、を含むことを特徴とする請求項1記載の半導体磁性体。

【請求項6】 前記半導体量子ドットは、一つの第1の量子ドットと二つの第2の量子ドットを、一つの第2の量子ドットが第1の量子ドットの上側になり、もう一つの第2の量子ドットが第1の量子ドットの下側になるように二次元的に配置して一つの単位を形成し、該単位を複数個周期的に連らせて全体構成を形成するように配置されていることを特徴とする請求項5記載の半導体磁性体。

【請求項7】 第1の量子ドットは量子ドット間を電子が移動できる方向を4枝有し、第2の量子ドットは各々量子ドット間を電子が移動できる方向を1枝有し、前記一つの単位の第1の量子ドットの上側と下側の2枝が、前記一つの単位の第2の量子ドットBの下側の1枝と前記一つの単位の第2の量子ドットの上側の1枝と結合され、前記一つの単位の第1の量子ドットの左側の1枝が、左隣りの単位の第1の量子ドットの右側の1枝と結合され、前記一つの単位の第1の量子ドットの右側の1枝が右隣りの単位の第1の量子ドットの左側の1枝と結合されるように、第1、第2の量子ドットが結合されたことを特徴とする請求項6記載の半導体磁性体。

【請求項8】 前記半導体量子ドットは、三角形格子または直交格子の交差点にある第1の格子点上に配置された第1の量子ドットと、三角形格子または直交格子の端点にある第2の格子点上に配置された第2の量子ドットと、を含むことを特徴とする請求項1記載の半導体磁性体。

【請求項9】前記半導体量子ドットは、量子ドット間を電子が移動できる方向を4枝有する第1の量子ドット一つと、各々量子ドット間を電子が移動できる方向を1枝有する第2の量子ドット二つを二次元的に配置して一つの単位を形成し、該単位を複数個リング状に連ならせて全体構成を形成するように配置されていることを特徴とする請求項8記載の半導体磁性体。

【請求項10】前記一つの単位の第1の量子ドットの2枝が、前記一つの単位の一つの第2の量子ドットの1枝と前記一つの単位のもう一つの第2の量子ドットの1枝と結合され、前記一つの単位の第1の量子ドット残りの2枝が、一つの隣りの単位の第1の量子ドットの1枝ともう一つの隣りの単位の第1の量子ドットの1枝と結合されるように、第1、第2の量子ドットが二次元的に結合されたことを特徴とする請求項9記載の半導体磁性体。

【請求項11】前記半導体量子ドットは、立方体格子の交差点にある第1の格子点上に配置された第1の量子ドットと、立方体格子の交差点の中間点にある第2の格子点上に配置された第2の量子ドットと、を含むことを特徴とする請求項1記載の半導体磁性体。

【請求項12】前記半導体量子ドットは、量子ドット間を電子が移動できる方向を6枝有する第1の量子ドット一つと、各々量子ドット間を電子が移動できる方向を2枝有する第2の量子ドット三つを三次元的に配置して一つの単位を形成し、該単位を複数個周期的に連ならせて全体構成を形成するように配置されていることを特徴とする請求項11記載の半導体磁性体。

【請求項13】前記一つの単位の第1の量子ドットの3枝が、前記一つの単位の一つの第2の量子ドットの1枝と前記一つの単位のもう一つの第2の量子ドットの1枝と前記一つの単位のさらにもう一つの第2の量子ドットの1枝と結合され、前記一つの単位の第1の量子ドット残りの3枝が、一つの隣りの単位の第2の量子ドットの1枝ともう一つの隣りの単位の第2の量子ドットの1枝とさらにもう一つの隣りの単位の第2の量子ドットの1枝と結合されるように、第1、第2の量子ドットが三次元的に結合されたことを特徴とする請求項12記載の半導体磁性体。

【請求項14】前記半導体量子ドットは、第1の直線格子点にある第1の格子点上に配置された第1の量子ドットと、第1の直線格子を互い違いの方向で直交する第2の直線格子の両端点にある第2の格子点上に配置された第2の量子ドットと、を含むことを特徴とする請求項1記載の半導体磁性体。

【請求項15】前記半導体量子ドットは、量子ドット間を電子が移動できる方向を4枝有する第1の量子ドット一つと、各々量子ドット間を電子が移動できる方向を1枝有する第2の量子ドット二つを三次元的に配置して一つの単位を形成し、該単位を複数個周期的に連ならせて全体構成を形成するように配置されていることを特徴とする請求項14記載の半導体磁性体。

【請求項16】前記一つの単位の第1の量子ドットの2枝が、前記一つの単位の一つの第2の量子ドットの1枝と前記一つの単位のもう一つの第2の量子ドットの1枝と結合され、前記一つの単位の第1の量子ドット残りの2枝が、一つの隣りの単位の第1の量子ドットの1枝ともう一つの隣りの単位の第1の量子ドットの1枝と結合されるように、第1、第2の量子ドットが三次元的に結合されたことを特徴とする請求項15記載の半導体磁性体。

【請求項17】前記半導体量子ドットは、六角形または蜂の巣格子の交差点にある第1の格子点上に配置された第1の量子ドットと、六角形または蜂の巣格子の交差点の中間点にある第2の格子点上に配置された第2の量子ドットと、を含むことを特徴とする請求項1記載の半導体磁性体。

【請求項18】前記半導体量子ドットは、一つの第1の量子ドットと二つの第2の量子ドットを、一つの第2の量子ドットが第1の量子ドットの右下側になり、もう一つの第2の量子ドットが第1の量子ドットの左下側になるように二次元的に配置して一つの単位を形成し、該単位を複数個周期的に連ならせて全体構成を形成するように配置されていることを特徴とする請求項17記載の半導体磁性体。

【請求項19】第1の量子ドットは量子ドット間を電子が移動できる方向を3枝有し、第2の量子ドットは各々量子ドット間を電子が移動できる方向を2枝有し、前記一つの単位の第1の量子ドットの2枝が、前記一つの単位のひとつの第2の量子ドットの1枝と前記一つの単位のもう一つの第2の量子ドットの1枝と結合され、前記一つの単位の第1の量子ドットの残りの1枝が一つの隣りの単位の第2の量子ドットの1枝と結合され、前記一つの単位の一つの第2の量子ドットの残りの1枝がもう一つの隣りの単位の第1の量子ドットの1枝と結合され、前記一つの単位のもう一つの第2の量子ドットの残りの1枝がさらにもう一つの隣りの単位の第1の量子ドットの1枝と結合されるように、第1、第2の量子ドットが二次元的に結合されたことを特徴とする請求項18記載の半導体磁性体。

【請求項20】前記半導体量子ドットは、カゴメ状の全体構成における三角形格子の交差点にある格子点上に配置された量子ドットを含むことを特徴とする請求項1記載の半導体磁性体。

【請求項21】前記半導体量子ドットは、三つの量子ドットを、第1の量子ドットが第2の量子ドットの右下側になり、第3の量子ドットが第2の量子ドットの左下側になるように二次元的に配置して一つの単位を形成し、該単位を複数個周期的に連ならせて全体構成を形成するように配置されていることを特徴とする請求項20記載の半導体磁性体。

【請求項22】各量子ドットは量子ドット間を電子が移動できる方向を4枝有し、前記一つの単位の第1の量子ドットの2枝が、前記一つの単位の第2の量子ドットの1枝と前記一つの単位の第3の量子ドットの1枝と結合され、前記一つの単位の第2の量子ドットの2枝が、前記一つの単位の第3の量子ドットの1枝と前記一つの単位の第1の量子ドットの1枝と結合され、前記一つの単位の第3の量子ドットの2枝が、前記一つの単位の第1の量子ドットの1枝と前記一つの単位の第2の量子ドットの1枝と結合され、各量子ドットの残りの2枝が一つの隣りの単位の量子ドットの1枝ともう一つの隣りの単位の量子ドットの1枝と結合されるように、量子ドットが二次元的に結合されたことを特徴とする請求項21記載の半導体磁性体。

【請求項23】前記半導体量子ドットの各々が、1ナノメートルを越えないドット直径を有することを特徴とする請求項1記載の半導体磁性体。

【請求項24】前記半導体量子ドットが、1～2ナノメートルのドット間距離で配置されていることを特徴とする請求項1記載の半導体磁性体。

【請求項25】前記半導体量子ドットが、外部磁場が印加された時に観測可能な磁気抵抗効果を生ずることを特徴とする請求項1記載の半導体磁性体。

詳細な説明

## 【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は非磁性半導体を用いた磁性体に関するものである。

【0002】

【従来の技術】従来、磁性体を構成する磁性材料としては、磁鉄鉱( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )のような天然磁石、クロム鋼・高コバルト鋼などの合金鋼磁石、アルニコ・フェライト・希土類を含んだ磁石などがある。

【0003】従来は、これらの磁性材料を用いて、磁気記憶媒体や磁気センサーのようば回路が作製されてきた。しかし、これらの磁性材料はすべて金属物質を含んでおり、シリコンやGaAsを用いたLSI基板上に作製することには、物質同志の融合性が悪いことなど様々な製造プロセス上の問題点が存在するため、トランジスターのようなLSI基板上の電子部品とは別の部品として回路を構成する必要があり、電子回路の小型化・高集積化の障害となっていた。

【0004】一方、フラットバンド構造を用いて磁性体を作製しようとする理論的提案があった。フラットバンド構造とは、電子のエネルギー分散が波数依存性をほとんど持たないバンド構造のことである。

【0005】一般に、縮退したエネルギー準位に電子を詰める場合、交換エネルギーを得しようとしてスピンを出るだけ平行に揃えようとする効果が働く。原子の核模型においてはフントの第一法則と呼ばれるものが、この効果の典型的な例である。

【0006】フラットバンドのような分散のない(つまり縮退の強い)系に電子を詰める場合にスピンをできるだけ平行にそろえようとする効果が働くことは、これまでハバード模型のような短距離クーロン相互作用を仮定した数学モデルを使ってリープ、ミールケ、タサキなどによって予言されていた。

【0007】しかし、彼らは数学モデルを解く際に短距離クーロン相互作用を仮定するなど多くの近似を使っており、このような数学モデルを使って予言されたフラットバンド強磁性状態が本当に現実に存在しているのかは、現実の物質に応じた正確な計算を行わないと正しく判定することはできなかった。

【0008】また、このリープ、ミールケ、タサキの提案に基づき、グラファイト、Ga原子、As原子のような非金属物質を用いて磁性体を作る理論的提案があった。

【0009】しかし、フラットバンドが実現するような物質を実際に人工的に合成したり、小さい原子を設計通りに配置することが困難であるため、これまでフラットバンド磁性体を作製することは出来なかった。

【0010】

【発明が解決しようとする課題】この様に、従来の金属元素からなる磁性体は既存の半導体LSIプロセスとの融合性がなく、同一基板上に作製できないという問題があった。

【0011】また、強磁性が発現するフラットバンド構造を持つ物質を非磁性物質を用いて作製することは、合成上・加工上の困難からこれまで不可能であった。

【0012】また、従来の磁性体はマンガンをクロムなどの有毒物質を含んでいる場合があり、人体や環境への悪影響が懸念されている。また、リサイクルの際のコスト上昇の一因ともなっている。

【0013】本発明は、このような課題を解決するものであり、半導体加工技術及び成長技術を用いて量子ドット列を形成することにより、フラットバンド構造を持つ半導体磁性体を提供することを目的とする。

【0014】

【課題を解決するための手段】このような課題を解決するため、本発明は、格子点上に、周囲にエネルギーポテンシャルの高い領域が形成され電子が閉じ込められた半導体量子ドットを配置することにより、隣接した量子ドット間を電子が移動可能であり、電子のエネルギー分散が波数依存性をほとんど持たないフラットバンド構造が電子エネルギーバンドに含まれるようしたことを特徴とする半導体磁性体を提供する。

【0015】また、本発明では、前記半導体量子ドットは、直交格子の交差点にある第1の格子点上に配置された第1の量子ドットと、直交格子の交差点の中間点にある第2の格子点上に配置された第2の量子ドットと、を含むことを特徴とする。

【0016】また、本発明では、前記半導体量子ドットは、一つの第1の量子ドットと二つの第2の量子ドットを、一つの第2の量子ドットが第1の量子ドットの右側になり、もう一つの第2の量子ドットが第1の量子ドットの上側になるように二次元的に配置して一つの単位を形成し、該単位を複数個周期的に連ならせて全体構成を形成するように配置されていることを特徴とする。

【0017】また、本発明では、第1の量子ドットは量子ドット間を電子が移動できる方向を4枝有し、第2の量子ドットは各々量子ドット間を電子が移動できる方向を2枝有し、前記一つの単位の第1の量子ドットの上側と右側の2枝が、前記一つの単位の一つの第2の量子ドットの左側の1枝と前記一つの単位のもう一つの第2の量子ドットの下側の1枝と結合され、前記一つの単位の第1の量子ドットの下側と左側の2枝が、左隣りの単位の第2の量子ドットの右側の1枝と下隣りの単位の第2の量子ドットの上側の1枝と結合され、前記一つの単位の一つの第2の量子ドットの右側の1枝が右隣りの単位の第1の量子ドットの左側の1枝と結合され、前記一つの単位のもう一つの第2の量子ドットの上側の1枝が上隣りの単位の第1の量子ドットの下側の1枝と結合されるように、第1、第2の量子ドットが結合されたことを特徴とする。

【0018】また、本発明では、前記半導体量子ドットは、第1の直線格子線上にある第1の格子点上に配置された第1の量子ドットと、第1の直線格子と直交する第2の直線格子の両端点にある第2の格子点上に配置された第2の量子ドットと、を含むことを特徴とする。

【0019】また、本発明では、前記半導体量子ドットは、一つの第1の量子ドットと二つの第2の量子ドットを、一つの第2の量子ドットが第1の量子ドットの上側になり、もう一つの第2の量子ドットが第1の量子ドットの下側になるように二次元的に配置して一つの単位を形成し、該単位を複数個周期的に連ならせて全体構成を形成するように配置されていることを特徴とする。

【0020】また、本発明では、第1の量子ドットは量子ドット間を電子が移動できる方向を4枝有し、第2の量子ドットは各々量子ドット間を電子が移動できる方向を1枝有し、前記一つの単位の第1の量子ドットの上側と下側の2枝が、前

記一つの単位の第2の量子ドットBの下側の1枝と前記一つの単位の第2の量子ドットの上側の1枝と結合され、前記一つの単位の第1の量子ドットの左側の1枝が、左隣りの単位の第1の量子ドットの右側の1枝と結合され、前記一つの単位の第1の量子ドットの右側の1枝が右隣りの単位の第1の量子ドットの左側の1枝と結合されるように、第1、第2の量子ドットが結合されたことを特徴とする。

【0021】また、本発明では、前記半導体量子ドットは、三角形格子または直交格子の交差点にある第1の格子点上に配置された第1の量子ドットと、三角形格子または直交格子の端点にある第2の格子点上に配置された第2の量子ドットと、を含むことを特徴とする。

【0022】また、本発明では、前記半導体量子ドットは、量子ドット間を電子が移動できる方向を4枝有する第1の量子ドット一つと、各々量子ドット間を電子が移動できる方向を1枝有する第2の量子ドット二つを二次元的に配置して一つの単位を形成し、該単位を複数個リング状に連らせて全体構成を形成するように配置されていることを特徴とする。

【0023】また、本発明では、前記一つの単位の第1の量子ドットの2枝が、前記一つの単位の一つの第2の量子ドットの1枝と前記一つの単位のもう一つの第2の量子ドットの1枝と結合され、前記一つの単位の第1の量子ドット残りの2枝が、一つの隣りの単位の第1の量子ドットの1枝ともう一つの隣りの単位の第1の量子ドットの1枝と結合されるように、第1、第2の量子ドットが二次元的に結合されたことを特徴とする。

【0024】また、本発明では、前記半導体量子ドットは、立方体格子の交差点にある第1の格子点上に配置された第1の量子ドットと、立方体格子の交差点の中間点にある第2の格子点上に配置された第2の量子ドットと、を含むことを特徴とする。

【0025】また、本発明では、前記半導体量子ドットは、量子ドット間を電子が移動できる方向を6枝有する第1の量子ドット一つと、各々量子ドット間を電子が移動できる方向を2枝有する第2の量子ドット三つを三次元的に配置して一つの単位を形成し、該単位を複数個周期的に連らせて全体構成を形成するように配置されていることを特徴とする。

【0026】また、本発明では、前記一つの単位の第1の量子ドットの3枝が、前記一つの単位の一つの第2の量子ドットの1枝と前記一つの単位のもう一つの第2の量子ドットの1枝と結合され、前記一つの単位の第1の量子ドット残りの3枝が、一つの隣りの単位の第2の量子ドットの1枝ともう一つの隣りの単位の第2の量子ドットの1枝とさらにもう一つの隣りの単位の第2の量子ドットの1枝と結合されるように、第1、第2の量子ドットが三次元的に結合されたことを特徴とする。

【0027】また、本発明では、前記半導体量子ドットは、第1の直線格子線上にある第1の格子点上に配置された第1の量子ドットと、第1の直線格子線を互い違いの方向で直交する第2の直線格子の両端点にある第2の格子点上に配置された第2の量子ドットと、を含むことを特徴とする。

【0028】また、本発明では、前記半導体量子ドットは、量子ドット間を電子が移動できる方向を4枝有する第1の量子ドット一つと、各々量子ドット間を電子が移動できる方向を1枝有する第2の量子ドット二つを三次元的に配置して一つの単位を形成し、該単位を複数個周期的に連らせて全体構成を形成するように配置されていることを特徴とする。

【0029】また、本発明では、前記一つの単位の第1の量子ドットの2枝が、前記一つの単位の一つの第2の量子ドットの1枝と前記一つの単位のもう一つの第2の量子ドットの1枝と結合され、前記一つの単位の第1の量子ドット残りの2枝が、一つの隣りの単位の第1の量子ドットの1枝ともう一つの隣りの単位の第1の量子ドットの1枝と結合されるように、第1、第2の量子ドットが三次元的に結合されたことを特徴とする。

【0030】また、本発明では、前記半導体量子ドットは、六角形または蜂の巣格子の交差点にある第1の格子点上に配置された第1の量子ドットと、六角形または蜂の巣格子の交差点の中間点にある第2の格子点上に配置された第2の量子ドットと、を含むことを特徴とする。

【0031】また、本発明では、前記半導体量子ドットは、一つの第1の量子ドットと二つの第2の量子ドットを、一つの第2の量子ドットが第1の量子ドットの右下側になり、もう一つの第2の量子ドットが第1の量子ドットの左下側になるように二次元的に配置して一つの単位を形成し、該単位を複数個周期的に連らせて全体構成を形成するように配置されていることを特徴とする。

【0032】また、本発明では、第1の量子ドットは量子ドット間を電子が移動できる方向を3枝有し、第2の量子ドットは各々量子ドット間を電子が移動できる方向を2枝有し、前記一つの単位の第1の量子ドットの2枝が、前記一つの単位のひとつの第2の量子ドットの1枝と前記一つの単位のもう一つの第2の量子ドットの1枝と結合され、前記一つの単位の第1の量子ドットの残りの1枝が一つの隣りの単位の第2の量子ドットの1枝と結合され、前記一つの単位のひとつの第2の量子ドットの残りの1枝がもう一つの隣りの単位の第1の量子ドットの1枝と結合され、前記一つの単位のもう一つの第2の量子ドットの残りの1枝がさらにもう一つの隣りの単位の第1の量子ドットの1枝と結合されるように、第1、第2の量子ドットが二次元的に結合されたことを特徴とする。

【0033】また、本発明では、前記半導体量子ドットは、カゴメ状の全体構成における三角形格子の交差点にある格子点上に配置された量子ドットを含むことを特徴とする。

【0034】また、本発明では、前記半導体量子ドットは、三つの量子ドットを、第1の量子ドットが第2の量子ドットの右下側になり、第3の量子ドットが第2の量子ドットの左下側になるように二次元的に配置して一つの単位を形成し、該単位を複数個周期的に連らせて全体構成を形成するように配置されていることを特徴とする。

【0035】また、本発明では、各量子ドットは量子ドット間を電子が移動できる方向を4枝有し、前記一つの単位の第1の量子ドットの2枝が、前記一つの単位の第2の量子ドットの1枝と前記一つの単位の第3の量子ドットの1枝と結合され、前記一つの単位の第2の量子ドットの2枝が、前記一つの単位の第3の量子ドットの1枝と前記一つの単位の第1の量子ドットの1枝と結合され、前記一つの単位の第3の量子ドットの2枝が、前記一つの単位の第1の量子ドットの1枝と前記一つの単位の第2の量子ドットの1枝と結合され、各量子ドットの残りの2枝が一つの隣りの単位の量子ドットの1枝ともう一つの隣りの単位の量子ドットの1枝と結合されるように、量子ドットが二次元的に結合されたことを特徴とする。

【0036】また、本発明では、前記半導体量子ドットの各々が、1ナノメートルを越えないドット直径を有することを特徴とする。

【0037】また、本発明では、前記半導体量子ドットが、1～2ナノメートルのドット間距離で配置されていることを特徴とする。

【0038】また、本発明では、前記半導体量子ドットが、外部磁場が印加された時に観測可能な磁気抵抗効果を生ずることを特徴とする。

【0039】本発明に係る磁性体は、第1の格子点上に、周囲にエネルギーポテンシャルの高い領域が形成され電子が閉じ込められた第1の量子ドットを配置し、第2の格子点上に、周囲にエネルギーポテンシャルの高い領域が形成され電子が閉じ込められた第2の量子ドットを配置し、隣接した上記量子ドット間を電子が移動できるようにしたことを特徴とする。

【0040】これは、例えば、図1に示すように、格子の交差点である第1の格子点上に、上記第1の量子ドットA(図中、斜線を入れた丸印で示す、以下同様)を配置し、格子の交差点の途中である第2の格子点上に、第2の量子ドットB<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>(図中、単なる白丸印で示す、以下同様)を配置し、隣接した上記量子ドットA、B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>間を電子が移動できるようにしたものである。

【0041】また、本発明に係る磁性体は、上記において、前記第1の量子ドットは前記量子ドット間の電子が移動できる方向を4枝有し、前記第2の量子ドットは前記量子ドット間の電子が移動できる方向を2枝有し、前記第1の量子ドットの前記電子が移動できる方向のうち2枝は、おのおの別の前記第2の量子ドットの前記電子が移動できる方向のうち1枝に結合して、前記第1の量子ドット1つと前記第2の量子ドット2つによる単位を成し、前記第1の量子ドットの前記電子が移動できる方向のうち残り2枝は、おのおの前記単位を成す別の単位の前記第2の量子ドットの前記電子が移動できる方向のうち1枝に結合し、前記2つの第2の量子ドットの前記電子が移動できる方向の内おのおの残り1枝は、おのおの前記単位を成す別の単位の前記第1の量子ドットの前記電子が移動できる方向の内1枝に結合していることを特徴とする。

【0042】これは、図1を包括する上位概念であり、例えば、同図に示すように、第1の量子ドットA、第2の量子ドットB<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>を二次元的に配列したものであり、上記第1の量子ドットAは上下左右に4枝を有し、上記第2の量子ドットB<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>は上下に2枝を有し、これら第1の量子ドットAと第2の量子ドットB<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>で一つの単位を構成し、第1の量子ドットAを縦と上の2枝が同一の単位の第2の量子ドットB<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>の1枝と結合し、第1の量子ドットAの左としたの残りの2枝が別の単位をなす第2の量子ドットB<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>の1枝と結合し、第2の量子ドットB<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>の残りの1枝が別の単位をなす第1の量子ドットAの左と下の2枝と結合したものである。

【0043】また、本発明に係る磁性体は、上記において、前記単位が周期的に連なっていることを特徴とする。例えば、図1に示す構成を有するものである。

【0044】また、本発明に係る磁性体は、上記において、前記第1の量子ドットは前記量子ドット間の電子が移動できる方向を6枝有し、前記第2の量子ドットは前記量子ドット間の電子が移動できる方向を2枝有し、前記第1の量子ドットの前記電子が移動できる方向のうち3枝は、おのおの別の前記第2の量子ドットの前記電子が移動できる方向のうち1枝に結合して、前記第1の量子ドット1つと前記第2の量子ドット3つによる単位を成し、前記第1の量子ドットの前記電子が移動できる方向のうち残り3枝は、おのおの前記単位を成す別の単位の前記第2の量子ドットの前記電子が移動できる方向のうち1枝に結合し、前記3つの第2の量子ドットの前記電子が移動できる方向の内おのおの残り1枝は、おのおの前記単位を成す別の単位の前記第1の量子ドットの前記電子が移動できる方向の内1枝に結合していることを特徴とする。

【0045】これは、図5を包括する上位概念であり、例えば、同図に示すように、第1の量子ドット、第2の量子ドットを三次元的に配列したものであり、上記第1の量子ドットは上下前後左右に6枝を有し、上記第2の量子ドットは2枝を有し、これら第1の量子ドット1つと第2の量子ドット3つで単位をなしたものである。

【0046】また、本発明に係る磁性体は、上記において、前記単位が周期的に連なっていることを特徴とする。例えば、図5に示す構成を有するものである。

【0047】また、本発明に係る磁性体は、上記において、前記第1の量子ドットは前記量子ドット間の電子が移動できる方向を4枝有し、前記第2の量子ドットは前記量子ドット間の電子が移動できる方向を1枝有し、前記第1の量子ドットの前記電子が移動できる方向の内2枝は、おのおの別の前記第2の量子ドットの前記電子が移動できる方向に結合して、前記第1の量子ドット1つと前記第2の量子ドット2つによる単位を成し、前記第1の量子ドットの前記電子が移動できる方向の内残りの2枝は、おのおの前記単位を成す別の単位の前記第1の量子ドットの前記電子が移動できる方向の内1枝に結合していることを特徴とする。

【0048】これは、図2、図3、図4、図6、図7を包括する上位概念であり、例えば、同図に示すように、上記第1の量子ドットは上下左右に4枝を有し、上記第2の量子ドットは1枝を有し、これら第1の量子ドット1つと第2の量子ドット2つで単位をなしたものである。

【0049】また、本発明に係る磁性体は、上記において、前記単位が周期的に連なっていることを特徴とする。例えば、図2、図6に示す構成を有するものである。

【0050】また、本発明に係る磁性体は、上記において、前記単位がリング状に連なっていることを特徴とする。例えば、図3、図4に示す構成を有するものである。

【0051】また、本発明に係る磁性体は、上記において、前記第1の量子ドットは前記量子ドット間の電子が移動できる方向を3枝有し、前記第2の量子ドットは前記量子ドット間の電子が移動できる方向を2枝有し、前記第1の量子ドットの前記電子が移動できる方向の内2枝は、おのおの別の前記第2の量子ドットの前記電子が移動できる方向のうち1枝に結合して、前記第1の量子ドット1つと前記第2の量子ドット2つによる単位を成し、前記第1の量子ドットの前記電子が移動できる方向のうち残り1枝は、おのおの前記単位を成す別の単位の前記第2の量子ドットの前記電子が移動できる方向のうち1枝に結合し、前記2つの第2の量子ドットの前記電子が移動できる方向の内おのおの残り1枝は、おのおの前記単位を成す別の単位の前記第1の量子ドットの前記電子が移動できる方向の内1枝に結合していることを特徴とする。

【0052】これは、図8を包括する上位概念であり、例えば、同図に示すように、上記第1の量子ドットは3方向に3枝を有し、上記第2の量子ドットは2枝を有し、これら第1の量子ドット1つと第2の量子ドット3つで単位をなしたものである。

【0053】また、本発明に係る磁性体は、上記において、前記単位が周期的に連なっていることを特徴とする。例えば、図8に示す構成を有するものである。

【0054】以下において量子ドットを二次元平面上に並べたときの電子のエネルギーバンドを計算する。

【0055】ここで「量子ドット」とは半導体中のある領域の周りにエネルギーポテンシャルの高い領域を形成し、電子をその領域内に閉じ込めた構造をいう。

【0056】次のようなハミルトニアンを考える。

【0057】

【数1】

$$H = - \frac{\hbar^2}{2m^*} \Delta + \sum_i v(r-R_i) \quad (1)$$

ここで $m^*$ は電子の有効質量、 $v(r)$ はここのドットの閉じ込めポテンシャル、 $R_i$ はドットの位置である。

【0058】孤立したドットに対するシュレージンガー方程式は次の方程式を満たす縮退の無い固有値を持つと仮定する。

【0059】

【数2】

$$H_a \phi(r) = \left[ - \frac{\hbar^2}{2m^*} \Delta + v(r) \right] \phi(r) = \epsilon \phi(r) \quad (2)$$

我々は、図1(a)(b)に示すリープモデル、図2(a)(b)に示すポリマーモデルのような2種類の二次元ドット列を一つの単位(図中破線で囲む部分)として考える。

【0060】両モデルともサイトはAサイト及びBサイトの2種類の副格子に分けられる。

【0061】ここで「サイト」とは格子を構成する格子点のことを示し、この一にドットの中心を合わせるように置いておくことによってドット列が構成される。

【0062】電子がドットの近くに局在しており、隣合うドット間を飛び移ることができるすると、系は強結合モデルで良く記述できる。

【0063】Aサイト及びBサイトに対するブロッホ状態は次のように与えられる。

【0064】

【数3】

$$\Phi_{\alpha, k}(r) = \frac{1}{\sqrt{N_{\alpha}}} \sum_i e^{i k \cdot R_i} \phi(r-r_{\alpha}-R_i) \quad (3)$$

ここで $N_{\alpha}$ は副格子に含まれるサイトの数である。

【0065】ハミルトニアン(1)に対する固有状態は次のように書き表される。

【0066】

【数4】

$$\Psi_k(r) = \sum_n c_n \Phi_{n, k}(r) \quad (4)$$

$$H \Psi_k(r) = E \Psi_k(r) \quad (5)$$

最近接トランスファー及び重なり積分のみを考慮にいたした場合、我々は次のようなリープモデル、及びポリマーモデルに対する固有値方程式を得る。

【0067】

【数5】



$$\begin{pmatrix} \epsilon & t(1+e^{-2ik_x a}) & t(1+e^{-2ik_y a}) \\ t(1+e^{2ik_x a}) & \epsilon & 0 \\ t(1+e^{2ik_y a}) & 0 & \epsilon \end{pmatrix} \mathbf{c} \\
 = E \begin{pmatrix} 1 & s(1+e^{-2ik_x a}) & s(1+e^{-2ik_y a}) \\ s(1+e^{2ik_x a}) & 1 & 0 \\ s(1+e^{2ik_y a}) & 0 & 1 \end{pmatrix} \mathbf{c} \quad (6)$$

$$\begin{pmatrix} \epsilon+2t\cos(ka) & t & t \\ t & \epsilon & 0 \\ t & 0 & \epsilon \end{pmatrix} \mathbf{c} = E \begin{pmatrix} 1+2s\cos(ka) & s & s \\ s & 1 & 0 \\ s & 0 & 1 \end{pmatrix} \mathbf{c} \quad (7)$$

ここでトランスファー積分は $t = \int dr_{\parallel} \langle r \rangle H_{\parallel}(r+a)$ 、重なり積分は $s = \int dr_{\parallel} \langle r \rangle_{\parallel}(r+a)$ で与えられ、 $a = (a, 0)$ 、 $c = (c_1, c_2, c_3)$ である。

【0068】我々の強結合模型計算においては、通常はよく無視される最近接間の重なり積分をきちんと考慮した。

【0069】式(6)及び(7)は容易に解くことが出来て、固有値はリープモデルに対しては【数6】

$$E = \epsilon, \quad \epsilon - (t - \epsilon s) \frac{2\sqrt{\cos^2(k_x a) + \cos^2(k_y a)}}{1 \pm 2s\sqrt{\cos^2(k_x a) + \cos^2(k_y a)}} \quad (8)$$

ポリマーモデルに対しては【数7】

$$E = \epsilon, \quad \epsilon - \frac{2(\epsilon s - t)}{2s - \cos(ka) \pm \sqrt{2 + \cos^2(ka)}} \quad (9)$$

のように得られる。

【0070】図10(a)及び10(b)は式(8)及び(9)のバンド図を描いたものである。

【0071】両方の場合で、エネルギーをもつフラットバンドが形成されている。

【0072】このバンドが半分満たされ、クーロン相互作用が同じサイトにある電子間だけに強く働くとなると、リープの定理により基底状態は唯一に決まり、スピン $S = (|B| - |A|)/2$ をもつことが保証される。

【0073】リープの定理は数学的に厳密に証明された非常に一般的・普遍的なものであり、いくつかの条件が満たされればフラットバンドが形成され、強磁性が発現することが予想できる。その条件をまとめると、以下のようになる。

【0074】まず、フラットバンドが形成される条件は、半導体ドットにおいて(1)二種類の副格子からなり、(2)副格子内に含まれるドットの数異なり、(3)異なる副格子に属する隣り合う二つのドット間を電子が移動できることである。さらにこのようにして形成されたフラットバンド構造において強磁性が発現するためには、(4)バンドが半分満たされ(すなわち電子がドットあたり平均3個あり)、(5)ドット内にある電子間に斥力クーロン相互作用が働くと、リープの定理により必ず強磁性が発現する。

【0075】従ってこの五つの条件が満たされれば、ここで我々が示した構造以外でも強磁性が発現することが予想される。

【0076】我々は、図3、図4、図7、図8に示すように二次元平面上にドットを配列した例を考えたが、図5、図6に示すように三次元構造のような立体構造でもよい。

【0077】三次元構造は磁性の大きさを増す点で有利となるし、実際にドットを作成する際には平面上にドットを配列するより立体的に配列した方が作るのが加工製作上容易になることもある。

【0078】また、ドット間の結合角度は90度や180度などの特定の角度でなくてもよく、リープの定理が満たされる限り任意の角度でよい。

【0079】電子をドット内に閉じ込めるやり方も任意でよく、ドットの周りを真空や絶縁物で取り囲むような箱形(ハードウォール型)の閉じこめポテンシャルや空乏層による放物型の閉じこめポテンシャルが考えられる。またドットの形も任意でよい。

【0080】さらに、ドットを構成する物質はGaAs, InAs, GaInAs, AlAs, GaAlAsのようなIII-V族の半導体、SiやSiGeのようなIV族の半導体、CdTeのようなII-VI族の半導体などの物質が考えられる。

【0081】製造方法に関しては、既存の半導体加工技術及び半導体自己成長技術を用いることができる。

【0082】また、半導体ばかりでなく、金・銀・銅・白金・パラジウムのような金属微粒子でも同様の磁性体が作製できることが期待される。

【0083】以下に円形または球形のドットを作成した場合の、フラットバンド構造が形成されるようなドット半径とドット間距離の値を表に示した(単位はÅ)。

【0084】

【表1】

各 $t/\varepsilon$ に対するドット間距離 (a) とドット直径 (R) との関係							
$t/\varepsilon=0.1$		$t/\varepsilon=0.2$		$t/\varepsilon=0.3$		$t/\varepsilon=0.4$	
R (Å)	a (Å)	R (Å)	a (Å)	R (Å)	a (Å)	R (Å)	a (Å)
50	93	50	81	50	73	50	67
100	186	100	163	100	147	100	134
150	280	150	244	150	220	150	201
200	373	200	325	200	293	200	268
250	466	250	407	250	367	250	334
300	559	300	488	300	440	300	401
350	653	350	569	350	513	350	468
400	746	400	651	400	586	400	535
450	839	450	732	450	660	450	602
500	932	500	814	500	733	500	669

本発明で予言した半導体ドット強磁性体を用いると、半導体であることの利点を生かした様々な実施例が考えられる。

【0085】例えば、磁石そのものとして利用する例、磁気記憶媒体及び記憶素子(水平型及び備垂直型)として利用する例、磁気センサーとして利用する例が考えられる。

【0086】磁気センサーの中には、電流磁気効果を利用して磁場の大きさと電流の大きさを相互に変換する素子(磁気抵抗効果素子、ホール素子)、電磁誘導作用を利用して磁束の時間変化と起電力を相互に変換する素子(磁気ヘッド、モーター)、磁気吸引反発作用を利用して機械的にスイッチングを行う素子(リードスイッチ、リードリレー)が考えられる。

【0087】以上、説明したように、本発明は、半導体を使ってドット磁性体を作成することは、既存の半導体加工技術及び成長技術を利用できる点と、トランジスターなどの従来デバイスと同一基板状に作成できる点で大きな利点を持っている。

【0088】半導体ドット磁性体を用いることによって今後さらにいっそう進であろうLSIチップの小型化・高集積化に大いに貢献するものと考えられる。

【0089】また、半導体は電子の移動度やドット形状を変えることが容易かつ高精度で出来るため、極めて制御性よくドット磁性体が作製できると考えられる。

【0090】このことは生産性の点で品質や歩留まりの向上につながる。

【0091】

【発明の実施の形態】以下、図1～図12を参照して、本発明に係る磁性体の実施の形態について詳細に説明する。

【0092】まず、本発明の磁性体がある基礎としている理論的原理について説明する。

【0093】量子ドットを二次元平面上に並べたときの電子のエネルギーバンドは、以下のようにして計算することができる。ここで「量子ドット」とは、ある領域の周りにエネルギーポテンシャルの高い領域を形成し、電子をその領域内に閉じ込めた構造をいう。

【0094】次のようなハミルトニアンを考える。

【0095】

【数8】

$$H = - \frac{\hbar^2}{2m^*} \Delta + \sum_i v(r-R_i) \quad (10)$$

ここで  $m^*$  は電子の有効質量、 $v(r)$  は個々のドットの閉じ込めポテンシャル、 $R_i$  はドットの位置である。

【0096】孤立したドットに対するシュレージンガー方程式は次の方程式を満たす縮退の無い固有値を持つと仮定する。

【0097】

【数9】

$$H_0 \phi(r) = \left[ - \frac{\hbar^2}{2m^*} \Delta + v(r) \right] \phi(r) = \varepsilon \phi(r) \quad (11)$$

以下、図1(a)(b)に示すリープモデル、図2(a)(b)に示すポリマーモデル及び図9に示すカゴメモデルを考える。

【0098】電子がドットの近くに局在しており、隣合うドット間を飛び移ることができるとすると、系は強結合模型で良く記述できる。

【0099】強結合模型においてプロット状態は次のように与えられる。

【0100】

【数10】

$$\Phi_{\alpha, k}(r) = \frac{1}{\sqrt{N_\alpha}} \sum_i e^{i k \cdot R_i} \phi(r-r_\alpha-R_i) \quad (12)$$

ここで  $r_\alpha$  は単位セル内のドットの位置( $\alpha=1, 2, 3$ )、 $N_\alpha$  はドットの数である。

【0101】ハミルトニアン(10)に対する固有状態は次のように書き表される。

【0102】

【数11】

$$\Psi_k(r) = \sum_n c_n \phi_{n,k}(r) \quad (13)$$

$$H\Psi_k(r) = E\Psi_k(r) \quad (14)$$

最近接トランスファー及び重なり積分のみを考慮にいれた場合、次のようなリープモデル、及びポリマーモデル及びカゴメモデルに対する固有値方程式を得る。

【0103】

【数12】

$$\begin{pmatrix} \epsilon & t(1+e^{-2ik_x a}) & t(1+e^{-2ik_y a}) \\ t(1+e^{2ik_x a}) & \epsilon & 0 \\ t(1+e^{2ik_y a}) & 0 & \epsilon \end{pmatrix} \mathbf{c} = E \begin{pmatrix} 1 & s(1+e^{-2ik_x a}) & s(1+e^{-2ik_y a}) \\ s(1+e^{2ik_x a}) & 1 & 0 \\ s(1+e^{2ik_y a}) & 0 & 1 \end{pmatrix} \mathbf{c} \quad (15)$$

$$\begin{pmatrix} \epsilon+2t\cos(ka) & t & t \\ t & \epsilon & 0 \\ t & 0 & \epsilon \end{pmatrix} \mathbf{c} = E \begin{pmatrix} 1+2s\cos(ka) & s & s \\ s & 1 & 0 \\ s & 0 & 1 \end{pmatrix} \mathbf{c} \quad (16)$$

$$\begin{pmatrix} \epsilon & t(1+e^{-ik_x a}) & t(1+e^{-ik_y a}) \\ t(1+e^{ik_x a}) & \epsilon & t(1+e^{i(k_x - k_y)a}) \\ t(1+e^{ik_y a}) & t(1+e^{-i(k_x - k_y)a}) & \epsilon \end{pmatrix} \mathbf{c} = E \begin{pmatrix} 1 & s(1+e^{-ik_x a}) & s(1+e^{-ik_y a}) \\ s(1+e^{ik_x a}) & 1 & s(1+e^{i(k_x - k_y)a}) \\ s(1+e^{ik_y a}) & s(1+e^{-i(k_x - k_y)a}) & 1 \end{pmatrix} \mathbf{c} \quad (17)$$

ここでトランスファー積分は  $t = \int d\mathbf{r} \phi(\mathbf{r}) H \phi(\mathbf{r} + \mathbf{a})$ 、重なり積分は  $s = \int d\mathbf{r} \phi(\mathbf{r}) \phi(\mathbf{r} + \mathbf{a})$  で与えられ、 $\mathbf{a} = (a, 0)$ 、 $\mathbf{c} = (c_1, c_2, c_3)$  である。

この強結合模型計算においては、通常はよく無視される最近接間の重なり積分をきちんと考慮した。

【0104】式(15)、(16)、(17)は容易に解くことが出来て、固有値はリープモデル、ポリマーモデル、カゴメモデルに対して各々、【数13】

$$E = \varepsilon, \varepsilon - (t - \varepsilon s) \frac{2\sqrt{\cos^2(k_x a) + \cos^2(k_y a)}}{1 \pm 2s\sqrt{\cos^2(k_x a) + \cos^2(k_y a)}} \quad (18)$$

$$E = \varepsilon, \varepsilon - \frac{2(\varepsilon s - t)}{2s - \cos(ka) \pm \sqrt{2 + \cos^2(ka)}} \quad (19)$$

$$E = \varepsilon - 2t, \varepsilon - t(-1 \pm \sqrt{3 + 2\cos(k_x a) + 2\cos(k_x a - k_y a)}) \quad (20)$$

のように得られる。

【0105】図10(a)、10(b)及び10(c)は式(18)、(19)、(20)のバンド図を描いたものである。

【0106】図10(a)及び10(b)の $E = \varepsilon$ における直線により示される通り、式(18)、(19)の場合にはエネルギー $\varepsilon$ をもつフラットバンドが形成されており、また図10(c)における $E = 2$ における直線により示される通り、式(20)の場合にはエネルギー $\varepsilon - 2t$ (図10(c)では便宜条 $t = -1$ とした)をもち、波数 $k_x, k_y$ に依存せず分散のないフラットバンドが形成されていることが分かる。

【0107】リープ、ミールケ、タサキによれば、フラットバンドのような分散のない(つまり縮退の強い)系に電子を詰める場合にスピンをできるだけ平行にそろえようとする効果が働くので、フラットバンド構造を有する物質を用いて強磁性を発現することが出来る。

【0108】さて、本発明は、このようなフラットバンド構造を有する物質の、実際に実現可能な具体的な形態として、半導体加工技術及び成長技術を用いて作成することが可能な半導体量子ドット列により形成されたフラットバンド構造を有する半導体磁性体を提供するものである。

【0109】具体的には、本発明に係る磁性体は、格子点上に、周囲にエネルギーポテンシャルの高い領域が形成され電子が閉じ込められた半導体量子ドットを配置することにより、隣接した量子ドット間を電子が移動可能であり、電子のエネルギー分散が波数依存性をほとんど持たないフラットバンド構造が電子エネルギーバンドに含まれるようにすることにより形成される。

【0110】図1に本発明に係る磁性体の第一の実施形態を示す。これは、直交格子の交差点にある第1の格子点上に、第1の量子ドットA(図中、斜線を入れた丸印で示す)を配置し、直交格子の交差点の中間点にある第2の格子点上に、第2の量子ドット $B_1$ 、 $B_2$ (図中、単なる白丸印で示す)を配置し、隣接した量子ドットA、 $B_1$ ( $B_2$ )間を電子が移動できるようにしたものである。

【0111】より詳細には、図1(a)に示すように、一つの第1の量子ドットAと二つの第2の量子ドット $B_1$ 、 $B_2$ を、一つの第2の量子ドット $B_1$ が第1の量子ドットAの右側になり、もう一つの第2の量子ドット $B_2$ が第1の量子ドットAの上側になるように二次元的に配置して一つの単位を形成する。

【0112】即ち、第1の量子ドットAは量子ドット間を電子が移動できる方向を4枝有し、第2の量子ドット $B_1$ 、 $B_2$ は各々量子ドット間を電子が移動できる方向を2枝有し、第1の量子ドットAの上側と右側の2枝が、同じ単位の第2の量子ドット $B_1$ の左側の1枝と同じ単位の第2の量子ドット $B_2$ の下側の1枝と結合されるようにこれら第1、第2の量子ドットが結合される。そして、図1(b)に示すように、一つの単位の第1の量子ドットAの下側と左側の2枝が、左隣りの単位の第2の量子ドットの右側の1枝と下隣りの単位の第2の量子ドットの上側の1枝と結合され、一つの単位の第2の量子ドット $B_1$ の右側の1枝が右隣りの単位の第1の量子ドットの左側の1枝と結合され、一つの単位の第2の量子ドット $B_2$ の上側の1枝が上隣りの単位の第1の量子ドットの下側の1枝と結合されるように、隣接する単位同志が結合される。

【0113】図1に示すように、第一の実施形態の磁性体は、上述した単位が複数個周期的に連なった全体構成を有することができる。

【0114】図2に本発明に係る磁性体の第二の実施形態を示す。これは、第1の直線格子線上にある第1の格子点上に、第1の量子ドットA(図中、斜線を入れた丸印で示す)を配置し、第1の直線格子と直交する第2の直線格子の両端点にある第2の格子点上に、第2の量子ドット $B_1$ 、 $B_2$ (図中、単なる白丸印で示す)を配置し、隣接した量子ドットA、 $B_1$ ( $B_2$ )間を電子が移動できるようにしたものである。

【0115】より詳細には、図2(a)に示すように、一つの第1の量子ドットAと二つの第2の量子ドット $B_1$ 、 $B_2$ を、一つの第2の量子ドット $B_1$ が第1の量子ドットAの上側になり、もう一つの第2の量子ドット $B_2$ が第1の量子ドットAの下側になるように二次元的に配置して一つの単位を形成する。

【0116】即ち、第1の量子ドットAは量子ドット間を電子が移動できる方向を4枝有し、第2の量子ドット $B_1$ 、 $B_2$ は各々量子ドット間を電子が移動できる方向を1枝有し、第1の量子ドットAの上側と下側の2枝が、同じ単位の第2の量子ドット $B_1$ の下側の1枝と同じ単位の第2の量子ドット $B_2$ の上側の1枝と結合されるようにこれら第1、第2の量子ドットが結合される。そして、図2(b)に示すように、一つの単位の第1の量子ドットAの左側の1枝が、左隣りの単位の第1の量子ドットの右側の1枝と結合され、一つの単位の第1の量子ドットAの右側の1枝が右隣りの単位の第1の量子ドットの左側の1枝と結合されるように、隣接する単位同志が結合される。

【0117】図2に示すように、第二の実施形態の磁性体は、上述した単位が複数個周期的に連なった全体構成を有することができる。

【0118】図3に本発明に係る磁性体の第三の実施形態を示す。これは、三角形格子の交差点にある第1の格子点上

に、第1の量子ドット(図中、斜線を入れた丸印で示す)を配置し、三角形格子の端点にある第2の格子点上に、第2の量子ドット(図中、単なる白丸印で示す)を配置し、隣接した量子ドット間を電子が移動できるようにしたものである。  
【0119】この場合、量子ドット間を電子が移動できる方向を4枝有する第1の量子ドット一つと、各々量子ドット間を電子が移動できる方向を1枝有する第2の量子ドット二つを二次元的に配置して一つの単位を形成する。そして、第1の量子ドットの2枝が、同じ単位の一つの第2の量子ドットの1枝と同じ単位の一つの第2の量子ドットの1枝と結合され、第1の量子ドット残りの2枝が、一つの隣りの単位の第1の量子ドットの1枝ともう一つの隣りの単位の第1の量子ドットの1枝と結合されるように、これら第1、第2の量子ドットが二次元的に結合される。

【0120】図3に示すように、第三の実施形態の磁性体は、上述した単位が複数個リング状に連なった全体構成を有することができる。

【0121】図4に本発明に係る磁性体の第四の実施形態を示す。これは、直交格子の交差点にある第1の格子点上に、第1の量子ドット(図中、斜線を入れた丸印で示す)を配置し、直交格子の端点にある第2の格子点上に、第2の量子ドット(図中、単なる白丸印で示す)を配置し、隣接した量子ドット間を電子が移動できるようにしたものである。

【0122】この場合、量子ドット間を電子が移動できる方向を4枝有する第1の量子ドット一つと、各々量子ドット間を電子が移動できる方向を1枝有する第2の量子ドット二つを二次元的に配置して一つの単位を形成する。そして、第1の量子ドットの2枝が、同じ単位の一つの第2の量子ドットの1枝と同じ単位の一つの第2の量子ドットの1枝と結合され、第1の量子ドット残りの2枝が、一つの隣りの単位の第1の量子ドットの1枝ともう一つの隣りの単位の第1の量子ドットの1枝と結合されるように、これら第1、第2の量子ドットが二次元的に結合される。

【0123】図4に示すように、第四の実施形態の磁性体は、上述した単位が複数個リング状に連なった全体構成を有することができる。

【0124】図5に本発明に係る磁性体の第五の実施形態を示す。これは、立方体格子の交差点にある第1の格子点上に、第1の量子ドット(図中、斜線を入れた丸印で示す)を配置し、立方体格子の交差点の中間点にある第2の格子点上に、第2の量子ドット(図中、単なる白丸印で示す)を配置し、隣接した量子ドット間を電子が移動できるようにしたものである。

【0125】この場合、量子ドット間を電子が移動できる方向を6枝有する第1の量子ドット一つと、各々量子ドット間を電子が移動できる方向を2枝有する第2の量子ドット三つを三次元的に配置して一つの単位を形成する。そして、第1の量子ドットの3枝が、同じ単位の一つの第2の量子ドットの1枝と同じ単位の一つの第2の量子ドットの1枝と同じ単位の一つの第2の量子ドットの1枝と結合され、第1の量子ドット残りの3枝が、一つの隣りの単位の第2の量子ドットの1枝ともう一つの隣りの単位の第2の量子ドットの1枝とさらにもう一つの隣りの単位の第2の量子ドットの1枝と結合されるように、これら第1、第2の量子ドットが三次元的に結合される。

【0126】図5に示すように、第五の実施形態の磁性体は、上述した単位が複数個周期的に連なった全体構成を有することができる。

【0127】図6に本発明に係る磁性体の第六の実施形態を示す。これは、第1の直線格子線上にある第1の格子点上に、第1の量子ドット(図中、斜線を入れた丸印で示す)を配置し、第1の直線格子を互い違いの方向で直交する第2の直線格子の両端点にある第2の格子点上に、第2の量子ドット(図中、単なる白丸印で示す)を配置し、隣接した量子ドット間を電子が移動できるようにしたものである。

【0128】この場合、量子ドット間を電子が移動できる方向を4枝有する第1の量子ドット一つと、各々量子ドット間を電子が移動できる方向を1枝有する第2の量子ドット二つを三次元的に配置して一つの単位を形成する。そして、第1の量子ドットの2枝が、同じ単位の一つの第2の量子ドットの1枝と同じ単位の一つの第2の量子ドットの1枝と結合され、第1の量子ドット残りの2枝が、一つの隣りの単位の第1の量子ドットの1枝ともう一つの隣りの単位の第1の量子ドットの1枝と結合されるように、これら第1、第2の量子ドットが三次元的に結合される。

【0129】図6に示すように、第六の実施形態の磁性体は、上述した単位が複数個周期的に連なった全体構成を有することができる。

【0130】なお、第五の実施形態や第六の実施形態のような三次元構造は磁性の大きさを増す点で有利となるし、実際にドットを作成する際には平面上にドットを配列するより立体的に配列した方が作るのが加工製作上容易になることもある。

【0131】図7に本発明に係る磁性体の第七の実施形態を示す。これは、第四の実施形態と同様に、直交格子の交差点にある第1の格子点上に、第1の量子ドット(図中、斜線を入れた丸印で示す)を配置し、直交格子の端点にある第2の格子点上に、第2の量子ドット(図中、単なる白丸印で示す)を配置し、隣接した量子ドット間を電子が移動できるようにしたものである。

【0132】この場合、各々が第四の実施形態の構成をとる複数の磁性体を二次元的に配置している。

【0133】図8に本発明に係る磁性体の第八の実施形態を示す。これは、六角形(蜂の巣)格子の交差点にある第1の格子点上に、第1の量子ドット(図中、斜線を入れた丸印で示す)を配置し、六角形格子の交差点の中間点にある第2の格子点上に、第2の量子ドット(図中、単なる白丸印で示す)を配置し、隣接した量子ドット間を電子が移動できるようにしたものである。

【0134】より詳細には、図8(a)に示すように、一つの第1の量子ドットと二つの第2の量子ドットを、一つの第2の量子ドットが第1の量子ドットの右下側になり、もう一つの第2の量子ドットが第1の量子ドットの左下側になるように二次元的に配置して一つの単位を形成する。

【0135】即ち、第1の量子ドットは量子ドット間を電子が移動できる方向を3枝有し、第2の量子ドットは各々量子ドット間を電子が移動できる方向を2枝有し、第1の量子ドットの2枝が、同じ単位の一つの第2の量子ドットの1枝と同じ単位の一つの第2の量子ドットの1枝と結合され、第1の量子ドット残りの1枝が一つの隣りの単位の第2の量子ドットの1枝と結合され、一つの第2の量子ドット残りの1枝がもう一つの隣りの単位の第1の量子ドットの1枝と結合され、もう一つの第2の量子ドット残りの1枝がさらにもう一つの隣りの単位の第1の量子ドットの1枝と結合されるように、これら第1、第2の量子ドットが二次元的に結合される。

【0136】図8に示すように、第八の実施形態の磁性体は、上述した単位が複数個周期的に連なった全体構成を有することができる。

【0137】図9に本発明に係る磁性体の第九の実施形態を示す。これは、カゴメ状の全体構成における三角形格子の交差点にある格子点上に、三つの量子ドット $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ (図中、単なる白丸印で示す)を配置し、隣接した量子ドット $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 間を電子が移動できるようにしたものである。

【0138】より詳細には、図9(a)に示すように、三つの量子ドットを、一つの量子ドットがある量子ドットの右下側になり、もう一つの量子ドットが該ある量子ドットの左下側になるように二次元的に配置して一つの単位を形成する。

【0139】即ち、各量子ドットは量子ドット間を電子が移動できる方向を4枝有し、各量子ドット $A_1$ ( $A_2$ 、 $A_3$ )の2枝が、同じ単位のもうひとつの量子ドット $A_2$ ( $A_3$ 、 $A_1$ )の1枝と同じ単位のさらにもう一つの量子ドット $A_3$ ( $A_1$ 、 $A_2$ )の1枝と結合され、量子ドットの残りの2枝が一つの隣りの単位の量子ドットの1枝ともう一つの隣りの単位の量子ドットの1枝と結合されるように、これら三つの量子ドットが二次元的に結合される。

【0140】図9に示すように、第八の実施形態の磁性体は、上述した単位が複数個周期的に連なった全体構成を有することができる。

【0141】上述した各実施形態の磁性体において、量子ドット間の結合角度は90度や180度などの特定の角度でなくともよく、フラットバンドが形成される限り任意の角度でよい。

【0142】また、電子を量子ドット内に閉じ込めるやり方も任意でよく、例えば、ドットの周りを真空や絶縁物で取り囲むような箱形(ハードウォール型)の閉じこめポテンシャルや空乏層による放物型の閉じこめポテンシャルが考えられる。またドットの形も任意でよい。

【0143】さらに、ドットを構成する物質はGaAs、InAs、GaInAs、AlAs、GaAlAsのようなIII-V族の半導体、SiやSiGeのようなIV族の半導体、CdTeのようなII-VI族の半導体などの物質が考えられる。

【0144】製造方法に関しては、既存の半導体加工技術及び成長技術を用いることができる。

【0145】図11に強磁性が発現する臨界温度(単位はケルビンK)とドット直径(単位はナノメートルnm)との関係をGaAsドット列とSiドット列を図9のカゴメモデルに並べた場合のハバード模型の厳密対角化の方法による計算例を示す。ここでドット間距離はドット直径の1.5倍と仮定したが、1.2倍から2倍までの間で結果はほとんど変わらない。実際上は、ドット直径の1.0~2.0倍のドット間距離を用いることが好ましい。なお、臨界温度とドット直径との関係はリープモデルやポリマーモデルの場合でも図11に示したものとほとんど同じである。

【0146】図11からわかるように、ドットが数ナノメートルと小さくなると室温(300K)を越える温度で強磁性が発現し得る。実際上は、1ナノメートルを越えないドット直径を用いることが好ましく、その場合、1~2ナノメートルのドット間距離を用いることが好ましい。現在の技術においてもこの大きさのドットがすでに盛んに作成されており、室温での強磁性発現は現実的である。

【0147】更に、本発明の半導体磁性体は、巨大な電流磁気効果を発生することが可能である。図12に示したように、図9のカゴメモデルの2次元ドット列に対して垂直に印加された外部磁場の強さを大きくしてゆくと、面内の電気抵抗が大きく減少する。これは磁場の進入によってフラットバンドが分散を持ち始め、絶縁体から金属への転移が起こるためである。

【0148】このようにフラットバンド磁性体を使って巨大な磁気抵抗効果を発現させることは、本発明の半導体磁性体を用いることにより実現可能となる新規な特徴であり、これまで知られていなかったものである。即ち、数オングストローム程度の小さい格子間隔を持つグラファイトや原子細線などでは、磁気抵抗効果は非常に小さく観測されない。これに対して本発明の半導体磁性体により発生される磁気抵抗効果は、数ナノメートル程度の大きい格子間隔と、小さい電子有効質量を持つ量子ドット列でなければ発現しない半導体特有の現象である。このような巨大磁気抵抗効果を利用すると、本発明の半導体磁性体を用いて例えば半導体材料だけを使った高感度磁気センサーや磁気ヘッドを実現することが可能となる。

【0149】本発明の半導体磁性体には、半導体であることの利点を生かした様々な応用例が考えられる。

【0150】例えば、磁石そのものとして利用する例、磁気記憶媒体及び記憶素子(水平型及び垂直型)として利用する例、磁気センサーとして利用する例が考えられる。

【0151】磁気センサーの中には、電流磁気効果を利用して磁場の大きさと電流の大きさを相互に変換する素子(磁気抵抗効果素子、ホール素子)、電磁誘導作用を利用して磁束の時間変化と起電力を相互に変換する素子(磁気ヘッド、モーター)、磁気吸引反発作用を利用して機械的にスイッチングを行う素子(リードスイッチ、リードリレー)が考えられる。

【0152】

【発明の効果】以上説明したように、本発明の半導体磁性体は、既存の半導体加工技術及び成長技術を利用できる点と、トランジスタなどの従来デバイスと同一基板状に作成できる点で大きな利点を持っている。

【0153】本発明の半導体磁性体は、LSIチップの小型化・高集積化に大いに貢献することが出来る。

【0154】また、半導体を用いていることにより、電子の移動度やドット形状を変えることが容易かつ高精度で出来るため、極めて制御性のよい半導体磁性体の作製が実現可能である。このことは生産性の点で品質や歩留まりの向上につながる。

【0155】また、シリコンなどの無毒な半導体物質だけで磁性体が作成できるので、人体や環境への悪影響を減らし、リサイクルコストを削減することができる。

## 図の説明

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の第一の実施形態に係る磁性体の構成を示す図。

【図2】本発明の第二の実施形態に係る磁性体の構成を示す図。

【図3】本発明の第三の実施形態に係る磁性体の構成を示す図。

【図4】本発明の第四の実施形態に係る磁性体の構成を示す図。

【図5】本発明の第五の実施形態に係る磁性体の構成を示す図。

【図6】本発明の第六の実施形態に係る磁性体の構成を示す図。

【図7】本発明の第七の実施形態に係る磁性体の構成を示す図。

【図8】本発明の第八の実施形態に係る磁性体の構成を示す図。

【図9】本発明の第九の実施形態に係る磁性体の構成を示す図。

【図10】図1のリープモデル、図2のポリマーモデル、および図9のカゴメモデルのバンド図。

【図11】図9のカゴメモデルにおける強磁性臨界温度とドット直径との関係を示すグラフ。

【図12】図9のカゴメモデルにおける印加磁場と面内電気抵抗との関係を示すグラフ。

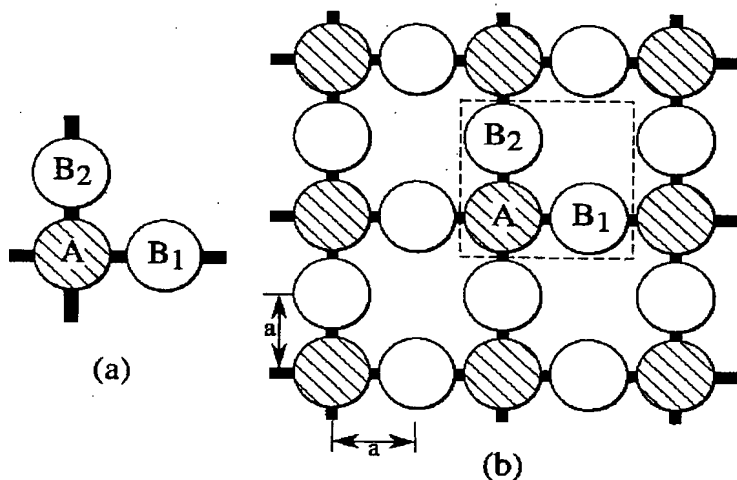
【符号の説明】

A, A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, A<sub>3</sub>, B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub> 量子ドット

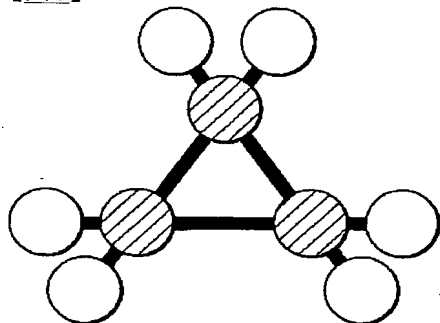
a ドット間距離

図面

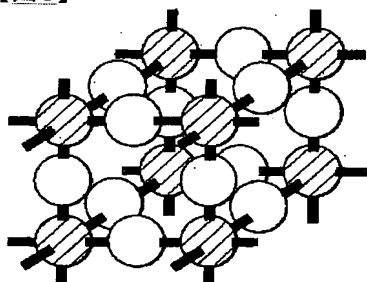
【図1】



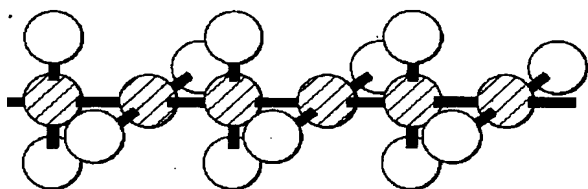
【図3】



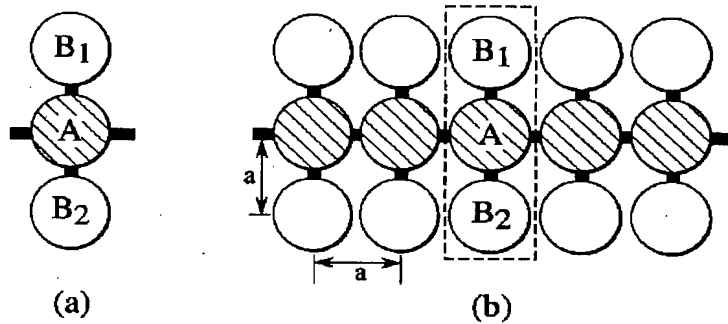
【図5】



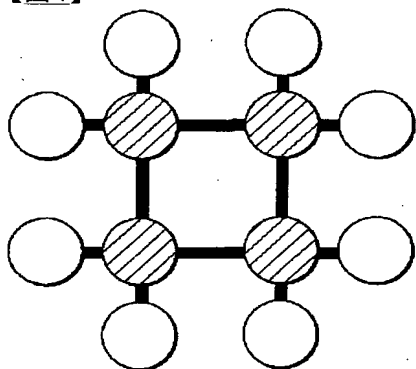
【図6】



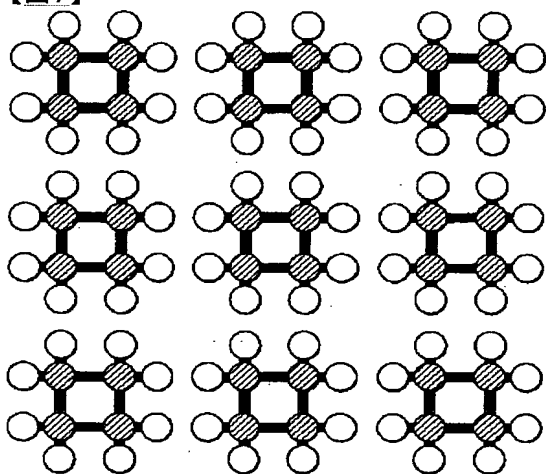
【図2】



【図4】



【図7】

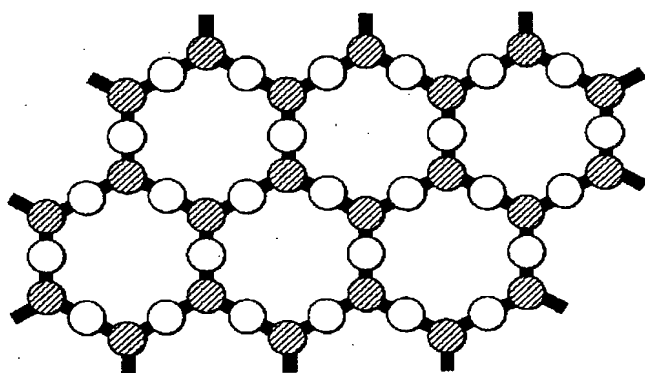


【図8】



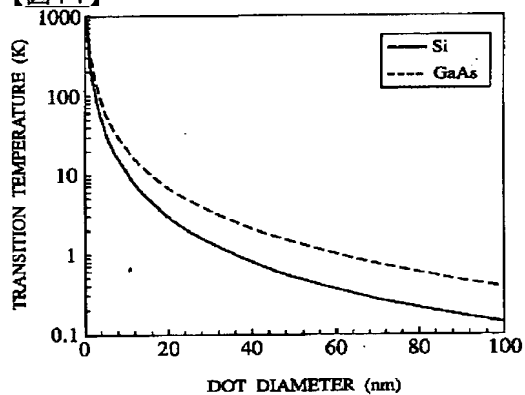


(a)

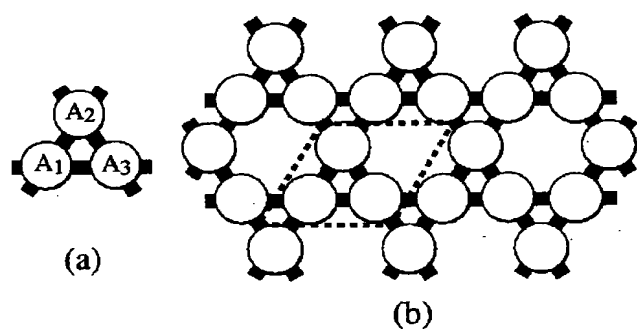


(b)

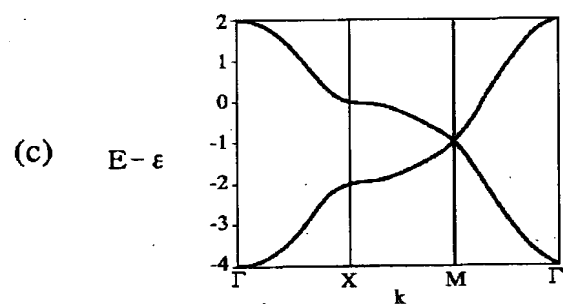
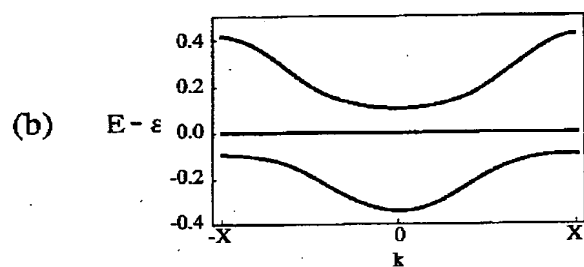
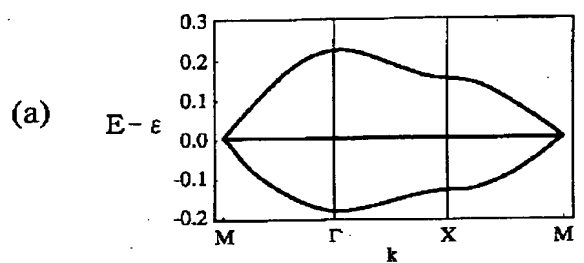
【図11】



【図9】



【図10】



【図12】

